DOI: 10.11858/gywlxb.20230728

弹体尾部斜锥面形状对侵彻偏转的影响

张丁山[1],张 博[1],付 良[2],徐 笑[1],李鹏飞[1]

(1. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065;
2. 中国兵器工业试验测试研究院, 陕西 华阴 714200)

摘要: 针对弹体斜侵彻多层靶时弹道发生的偏转问题,建立了弹体尾部为斜锥面结构的弹体侵彻偏转理论计算模型,获得了当速度为 0.2～1.2 km/s、着角为−30°～20°、弹体半径为 30～60 mm、尾翼斜面与弹轴的夹角为 0°～4°时偏转随尾部结构的变化规律,通过与试验结果进行对比,验证了模型的准确性。结果表明:弹体侵彻仰靶时,弹尾形成负的偏转力矩,弹体产生“低头”效果;弹体侵彻俯靶时,弹尾形成正的偏转力矩,弹体产生“抬头”效果;弹体尾部斜锥面产生的垂直弹轴的偏转力矩约为平行弹轴的偏转力矩的 100 倍;增大尾翼斜面与弹轴的夹角、尾翼长度、弹体半径均可增大偏转力矩;与增大尾翼长度相比,增大尾翼斜面与弹轴的夹角对增大偏转力矩更有效。

关键词: 多层靶;侵彻;偏转力矩;尾部形状;斜锥面结构

中图分类号: O385; TJ55 **文献标志码:** A

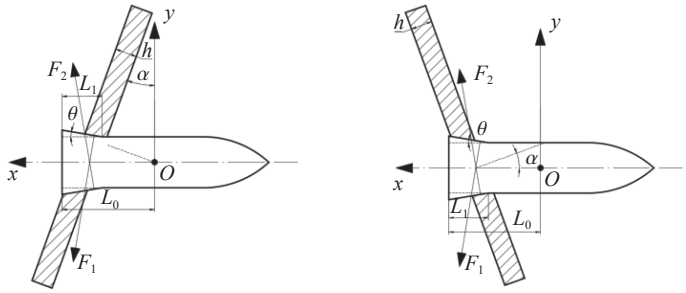
侵彻弹道偏转是侵彻弹体技术的主要研究内容之一,尤其斜侵彻多层靶标时,侵彻弹道偏转更加显著。根据侵彻历程,侵彻过程可分为弹头侵彻、弹体侵彻和弹尾侵彻 3 个阶段。在弹尾侵彻过程中,当弹尾直径大于弹体直径,如弹尾采用斜锥面结构时,弹尾将与靶标作用,进一步扩大弹孔,产生阻力。对于斜侵彻,当弹尾侵入(出)靶标时,弹尾的上或下表面率先接触靶标(出靶标),另一表面后接触靶标(出靶标),且上、下表面所受阻力不对称,该力不通过弹体质心,从而形成偏转力矩,引起弹体在侵彻过程中的第 3 阶段发生偏转,结合弹体侵彻偏转调控目标,可以设计不同弹尾斜锥面形状。第 3 阶段偏转力矩的大小与弹尾斜锥面形状、弹体质心位置等有直接关系,在确定弹体质心位置的前提下,不同弹尾形状引起的阻力大小以及距质心的力臂不同。因此,研究弹体尾部斜锥面形状对偏转力矩的影响对于掌握弹体侵彻弹道偏转规律、指导弹体尾部斜锥面形状设计具有一定的意义。

关于侵彻弹道偏转问题,我国的研究人员重点研究了头部形状、弹体形状、侵彻条件等对偏转及侵彻阻力的影响。例如:李鹏飞等[1]、葛超等[2]、张丁山等[3] 研究了弹头形状对侵彻偏转的影响,即侵彻第 1 阶段的偏转;杜华池等[4]、薛建锋等[5]、康海峰等[6]、段卓平等[7] 研究了弹体形状对侵彻偏转的影响;高旭东等[8]、吴普磊等 [9]、邓勇军等[10] 研究了攻角、靶标结构等侵彻条件对侵彻偏转的影响;成丽蓉等[11]、马兆芳等[12] 研究了弹尾结构对侵彻偏转的影响,通过数值模拟,发现弹尾结构对侵彻弹道偏转控制具有显著作用;柴传国等[13]、张爽等[14] 研究了弹体的侵彻阻力。大量成果加深了人们对侵彻弹道偏转的理解。为满足侵彻偏转调控需求,有必要深入研究不同工况下弹体尾部斜锥面结构变化对弹道偏转的影响规律,从而掌握尾翼形状设计规律,指导尾部结构设计。带斜锥面尾翼的尾部是侵彻弹体的典型尾部之一。本研究拟通过理论分析、数值模拟和试验验证,重点研究带斜锥面尾翼的不同尾部形状对第 3 阶段弹道偏转的影响,为该类型弹体尾部结构优化设计提供指导。

* **收稿日期:** 2023-08-28; **修回日期:** 2023-11-21
基金项目: 国防重大基础研究专项
作者简介: 张丁山(1984—),男,博士,研究员,主要从事侵彻战斗部技术研究. E-mail: dingshan19840103@sohu.com

1　理论模型

以弹体质心为原点 O, 沿弹轴方向和垂直弹轴方向建立直角坐标系 Oxy, 质心向弹尾方向为 x 轴正方向。弹体着靶时, 弹轴与靶面法线的夹角为 α: 当靶板采用仰式布设时, 设 α 为正; 当靶板采用俯式布设时, 设 α 为负。弹尾侵彻时, 率先接触靶面的尾部侧面称为下表面, 通过弹轴并与之对称的尾部侧面称为上表面。图 1 为弹尾侵彻靶标示意图。



(a) Upward target　　(b) Downward target

图 1　弹尾侵彻靶标示意图

Fig. 1　Schematic diagram of projectile tail penetrating a target

为使研究问题得到简化, 作如下假设:

(1) 弹体为刚体, 尾部侵彻靶标时不发生变形;

(2) 相同侵彻条件下, 侵彻过程中压垮单位面积靶标产生的阻力 F_0 相同;

(3) 侵彻速度方向与弹轴方向相同, 即攻角为 0°;

(4) 弹体尾部结构的整体形状为斜锥面或圆柱面;

(5) 建模分析时, 只考虑弹尾扩孔产生的阻力形成的偏转力矩, 暂不考虑弹体振动引起的弹尾撞击靶标产生的撞击力形成的偏转力矩。

结合弹体尾部结构和侵彻靶标过程, 建立侵彻单层靶标过程中尾部上、下表面偏转力矩模型。质心距尾端面的距离为 L_0, 尾飘沿 x 轴方向的长度为 L_1, 尾飘斜面与弹轴夹角为 θ, 弹体圆柱段半径为 r, 靶板厚度为 h。其中 $L_1 \leqslant L_0$, $0° \leqslant \theta \leqslant 5°$(考虑弹体的侵彻阻力及侵彻深度, 设计时通常令 $\theta \leqslant 5°$, 大多数情况下 $\theta<4°$)。

尾部上表面方程为

$$y_1 = x\tan\theta + r + (L_1 - L_0)\tan\theta \qquad L_0 - L_1 \leqslant x \leqslant L_0 \tag{1}$$

尾部下表面方程为

$$y_2 = -x\tan\theta - r - (L_1 - L_0)\tan\theta \qquad L_0 - L_1 \leqslant x \leqslant L_0 \tag{2}$$

弹尾以速度 v 斜侵彻靶标时, 设侵彻时间为 t, 靶标迎弹面及背面的方程为

$$y_1' = -(x - vt - L_0 + L_1)\cot\alpha \tag{3}$$

$$y_2' = -(x - vt - L_0 + L_1 + h)\cot\alpha \tag{4}$$

将式 (1) 和式 (3) 或式 (4) 组成方程组, 分别求得靶标与弹体尾部上表面接触前后两端点坐标, 设定为 (x_1, y_1) 和 (x_1', y_1')。

$$y_1 = \begin{cases} x_1\tan\theta + r + (L_1 - L_0)\tan\theta & 0 \leqslant vt \leqslant L_1 \\ L_0\tan\theta + r + (L_1 - L_0)\tan\theta & vt > L_1 \end{cases} \tag{5}$$

$$y_1' = \begin{cases} r & 0 \leqslant vt \leqslant h \\ x_1'\tan\theta + r + (L_1 - L_0)\tan\theta & vt > h \end{cases} \tag{6}$$

将式 (2) 和式 (3) 或式 (4) 组成方程组, 可分别求得靶标与弹体尾部下表面接触两界限端点坐标, 设

定为 (x_2, y_2) 和 (x_2', y_2')。y_2、y_2'的取值方式与y_1、y_1'的取值方式相同。

侵彻过程中，上表面受到的阻力 F_1 为

$$F_1 = \frac{1}{2}\pi(y_1^2 - y_1'^2)F_0 \tag{7}$$

下表面受到的阻力 F_2 为

$$F_2 = \frac{1}{2}\pi(y_2^2 - y_2'^2)F_0 \tag{8}$$

当侵彻速度接近 0.8 km/s 时，侵彻阻力F_0的计算公式[13] 为

$$F_0 = 1.715\times10^{-7} f_c + 0.1486\rho v^2 \tag{9}$$

式中：f_c 为靶标的抗压强度，ρ为靶标的密度。

对阻力F_1、F_2进行分解，分解为平行弹轴的力F_{11}、F_{21}以及垂直弹轴的力F_{12}、F_{22}。

$$F_{11} = F_1\sin\theta,\quad F_{12} = F_1\cos\theta,\quad F_{21} = F_2\sin\theta,\quad F_{22} = F_2\cos\theta \tag{10}$$

规定使弹体产生“低头”的偏转力矩方向为负，使弹体产生“抬头”的偏转力矩方向为正。由F_{11}、F_{21}形成的平行弹轴偏转力矩差（简称平行力矩）M_p 为

$$M_p = \frac{y_1 + y_1'}{2}F_1\sin\theta - \frac{|y_2| + |y_2'|}{2}F_2\sin\theta \tag{11}$$

由F_{12}、F_{22}形成的垂直弹轴偏转力矩差（简称垂直力矩）M_v 为

$$M_v = \frac{x_1 + x_1'}{2}F_1\cos\theta - \frac{x_2 + x_2'}{2}F_2\cos\theta \tag{12}$$

弹尾完全穿过靶标过程中，由F_{11}、F_{21}形成的总偏转力矩差为

$$M_1 = \int_0^{L_1/v} M_p \mathrm{d}t \tag{13}$$

由F_{12}、F_{22}形成的总偏转力矩差为

$$M_2 = \int_0^{L_1/v} M_v \mathrm{d}t \tag{14}$$

由平行力矩和垂直力矩形成的合偏转力矩为

$$M = \sqrt{M_1^2 + M_2^2} \tag{15}$$

设I为弹体转动惯量，则由偏转力矩引起的弹体偏转角度β 为

$$\beta = \int_0^{L_1/v}\int_0^{L_1/v} \frac{1}{I}\sqrt{M_p^2 + M_v^2}\mathrm{d}t\mathrm{d}t \tag{16}$$

2　计算分析

应用建立的理论模型，对某 20 kg 弹体侵彻 0.15 m 厚单层钢筋混凝土靶过程中弹尾侵彻产生的偏转力矩进行计算，设 L_0=0.245 m 为定值，计算工况列于表 1，其中：v_0 为弹体的初始速度。

表 1　计算工况

Table 1　Calculation conditions

No.	v_0/(m·s^{-1})	α/(°)	r/m	L_1/m	Variable
1	800	10	0.06	0.08, 0.09, 0.13, 0.16	θ
2	200, 400, 800, 1 200	10	0.06	0.13	θ
3	800	10, 20, −15, −30	0.06	0.13	θ
4	800	10	0.03, 0.04, 0.05, 0.06	0.13	θ
5	400	10	0.06		θ, L_1

由图 2、图 3、图 4 和图 5（M_1^*和M_2^*分别表示单位力产生的平行力矩和垂直力矩）可知：侵彻仰靶时，弹尾形成负的平行力矩和垂直力矩，使弹体产生“低头”效果；侵彻俯靶时，弹尾形成正的平行力矩和垂直力矩，使弹体产生“抬头”效果；水平力矩和垂直力矩随着θ增大而增大；相同条件下，垂直力矩显著大于平行力矩，垂直力矩约为平行力矩的 100 倍。在相同的侵彻条件下，平行力矩和垂直力矩随着L_1、α、r的增大而增大；当速度v_0增大时，平行力矩和垂直力矩随θ增大而增大的幅度减小；如图 6 所示，与改变L_1相比，改变θ对平行力矩和垂直力矩的影响更大。

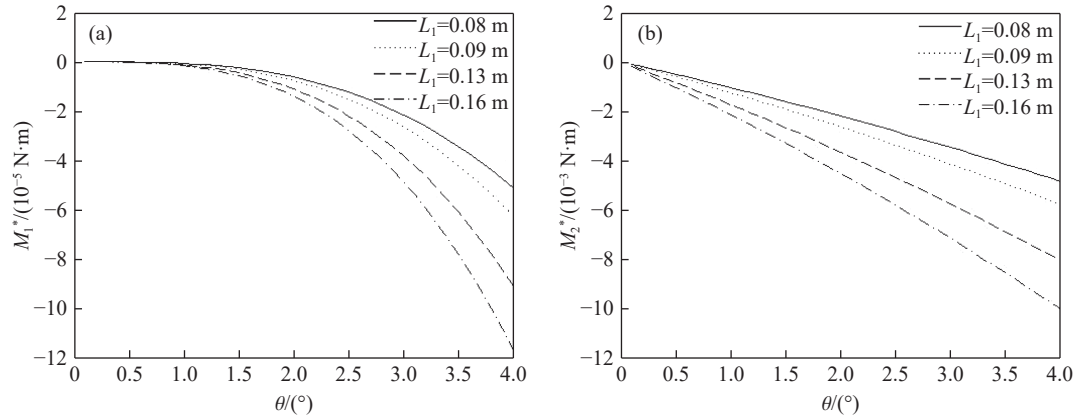


图 2　不同 L_1 时平行力矩 (a) 和垂直力矩 (b) 随 θ 的变化曲线（工况 1）

Fig. 2　Change curves of parallel moment (a) and vertical moment (b) with θ by different L_1 (Case 1)

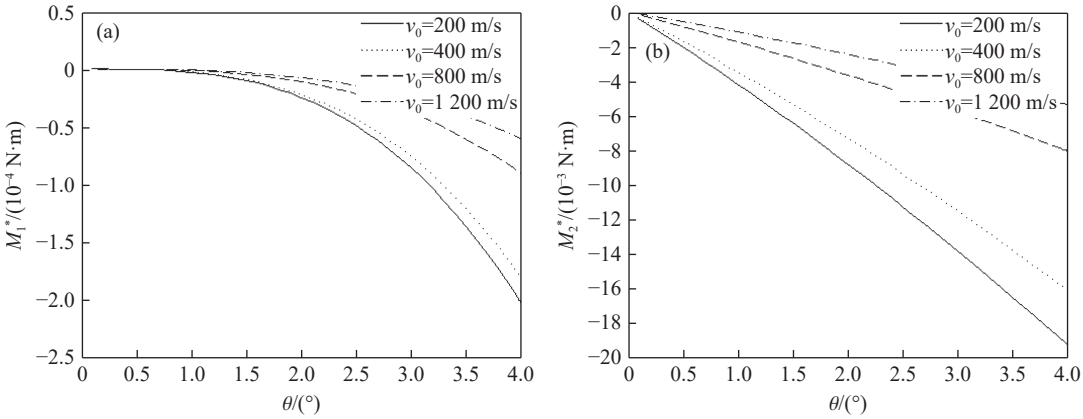


图 3　不同 v_0 时平行力矩 (a) 和垂直力矩 (b) 随θ的变化曲线（工况 2）

Fig. 3　Change curves of parallel moment (a) and vertical moment (b) with θ by different v_0 (Case 2)

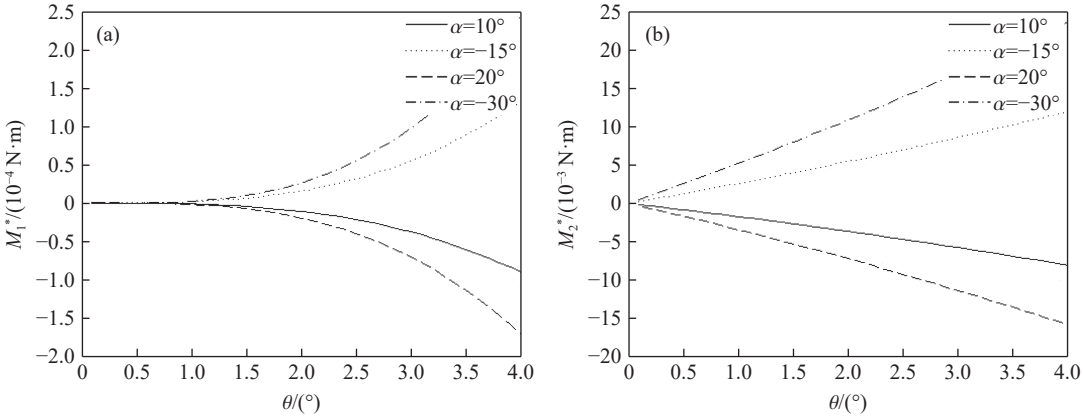


图 4　不同 α 时平行力矩 (a) 和垂直力矩 (b) 随θ的变化曲线（工况 3）

Fig. 4　Change curves of parallel moment (a) and vertical moment (b) with θ by different α (Case 3)

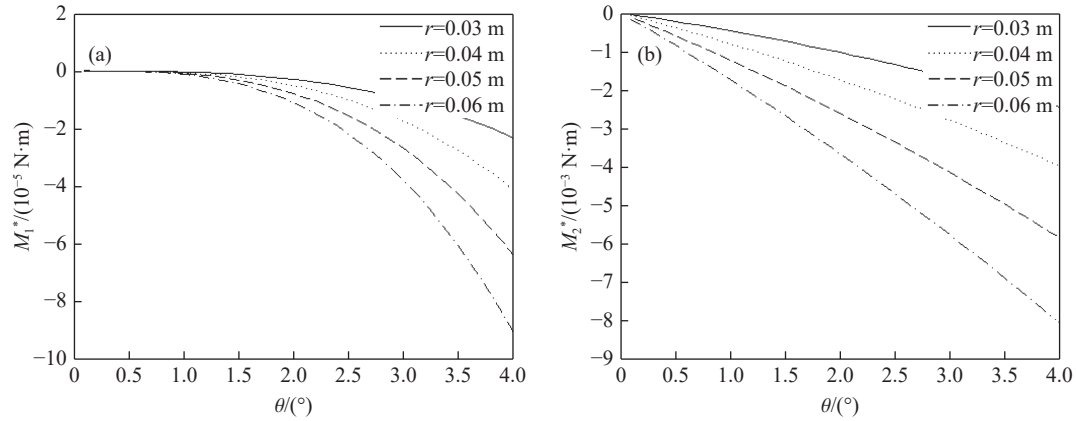


图 5　不同 r 时平行力矩 (a) 和垂直力矩 (b) 随 θ 的变化曲线(工况 4)

Fig. 5　Change curves of parallel moment (a) and vertical moment (b) with θ by different r (Case 4)

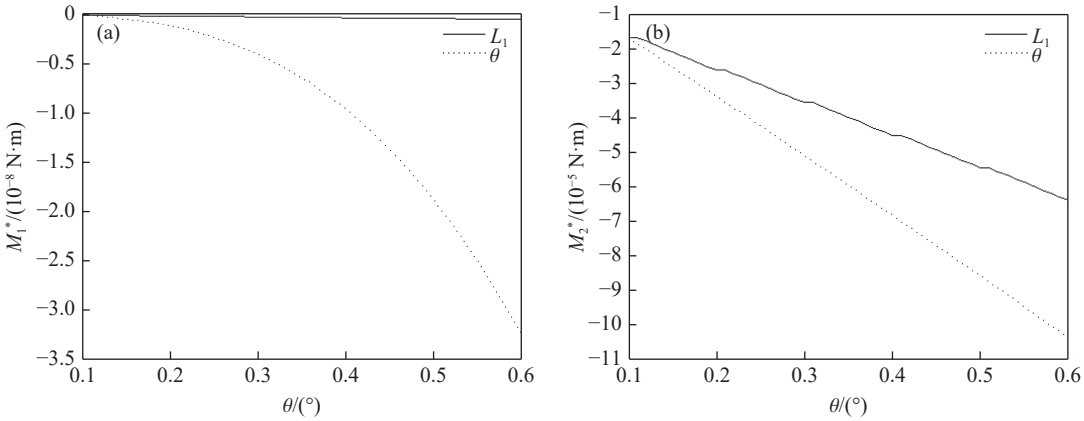


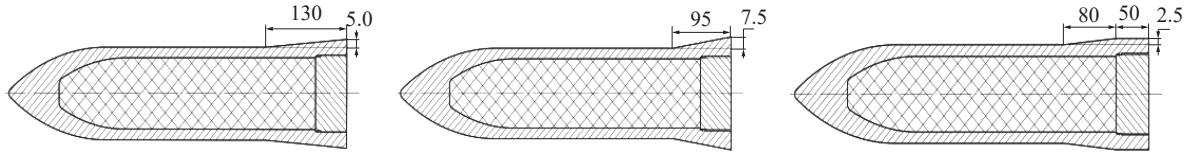
图 6　平行力矩 (a) 和垂直力矩 (b) 随 θ 和 L_1 的变化曲线(工况 5)

Fig. 6　Change curves of parallel moment (a) and vertical moment (b) with θ and L_1 (Case 5)

3　对比研究

3.1　理论计算

应用理论模型,分别计算 3 种不同弹尾结构的弹体侵彻单层混凝土靶过程中由弹尾引起的偏转情况,即暂不考虑弹体其余结构在侵彻过程中引起的偏转。3 种弹体结构如图 7 所示,样弹质量均为 20 kg,长度均为 540 mm,结构参数见表 2,其中:样弹 C 的尾飘长度(L_1)130 mm 由 80 mm 锥面和 50 mm 圆柱面组成。初始侵彻速度为 0.8 km/s,着角为 10°,靶板为 0.15 m 厚的单层 C40 混凝土仰靶。



(a) Projectile A　　(b) Projectile B　　(c) Projectile C

图 7　3 种弹体结构示意图(单位:mm)

Fig. 7　Schematic diagram of three kinds of projectiles (Unit: mm)

经计算,得出 3 种弹尾结构弹体侵彻单层混凝土靶过程中,由于弹尾与靶标作用形成的偏转力矩引起的弹体水平角加速度 a_{p}、垂直角加速度 a_{v}、角速度 ω 以及偏转角度 β 的变化曲线,如图 8、图 9、图 10 和图 11 所示。

表 2　弹体结构参数

Table 2　Structural parameters of projectiles

Projectile	r/mm	L_0/mm	L_1/mm	θ/(°)	I/(kg·m^2)
A	60	230	130	2.2	0.503 5
B	60	230	95	4.5	0.509 8
C	60	230	130	1.8	0.502 9

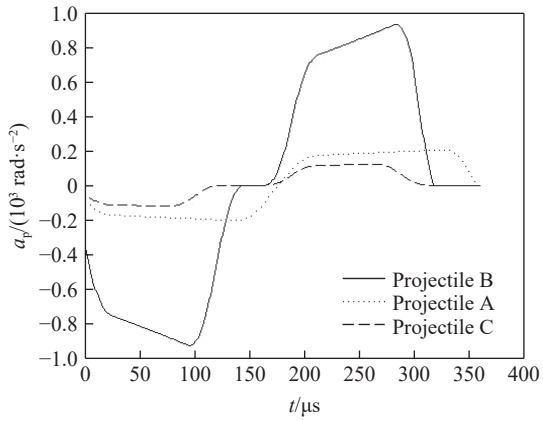


图 8　平行角加速度曲线

Fig. 8　Curves of parallel angular acceleration

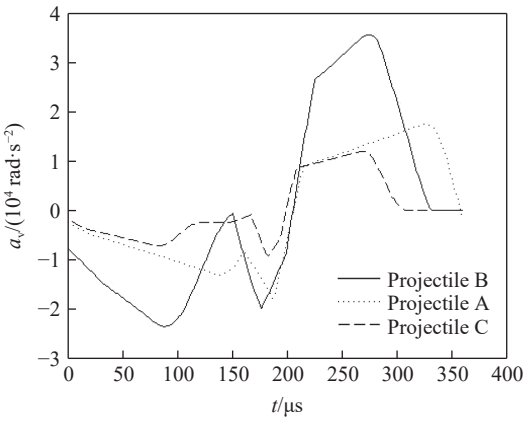


图 9　垂直角加速度曲线

Fig. 9　Curves of vertical angular acceleration

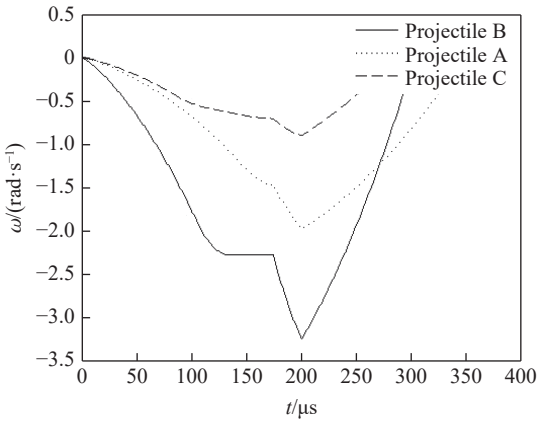


图 10　角速度曲线

Fig. 10　Curves of angular velocity

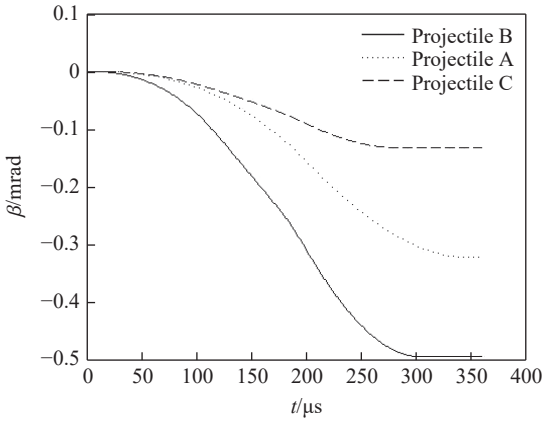


图 11　偏转角度曲线

Fig. 11　Curves of deflection angle

由图 8 和图 9 可知：弹尾侵彻过程中，存在负、正角加速度显著的前、后 2 个阶段，即前半段弹尾侵彻形成的偏转力矩为负力矩，弹体呈“低头”趋势，后半段弹尾侵彻形成的偏转力矩为正力矩，弹体呈“抬头”趋势；侵彻过程中，按照弹尾偏转力矩从大到小依次为弹体 B、弹体 A、弹体 C。

由图 10 和图 11 可知：弹尾在整个侵彻过程中产生的角速度以及弹体偏转角度均为负，即 3 种弹尾结构在侵彻仰靶的全过程中形成的弹体偏转角为负，弹体“低头”；按照弹体偏转角从大到小依次为弹体 B、弹体 A、弹体 C。

3.2　试验研究

通过研究 3 种弹尾结构对侵彻弹道偏转的影响，分析弹尾结构对偏转力矩的影响，对以往开展的相近样弹以 0.8 km/s 左右的速度、10°着角侵彻 5 层 C40 建筑物靶（首层靶的厚度为 150 mm，后 4 层靶的厚度均为 100 mm）的试验结果进行汇总。样弹如图 12 所示，样弹参数列于表 2。通过对比侵彻完 5 层靶后弹体偏转角度的大小，得出不同弹尾结构对侵彻弹道偏转的影响规律。



(a) Projectile A　　(b) Projectile B　　(c) Projectile C

图 12　试验样弹照片

Fig. 12　Pictures of test projectiles

由于侵彻试验中无法避免弹体头部和中部对靶标的侵彻，即通过试验获取的弹体偏转角度为整个弹体侵彻的综合作用结果，无法直接获取弹尾单独侵彻形成的弹体偏转角度，因此，设计弹体结构时，3 种弹体的头部和中部完全相同，以降低弹体头部和中部侵彻对结果分析产生的干扰。同时，为了降低试验条件对试验结果的影响，每种弹尾结构开展 2 次试验，对试验结果求平均，试验结果列于表 3，其中：β_0为着第 1 层靶前的弹体角度，β_5为出第 5 层靶后的弹体角度，$\beta_5-\beta_0$为弹体从进第 1 层靶开始到出第 5 层靶后的弹体偏转角度，$\bar{\beta}$为 2 发试验弹体偏转角的平均值。试验照片如图 13 所示。

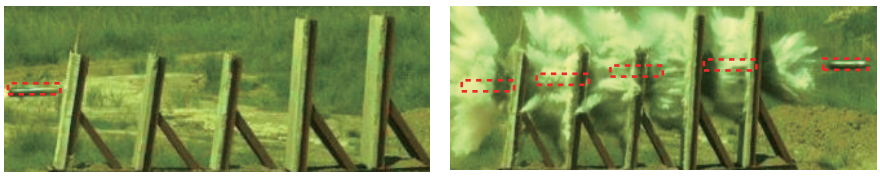
表 3　侵彻试验结果

Table 3　Penetration test results

Projectile	v_0/(m·s^{-1})	β_0/(°)	β_5/(°)	(β_5–β_0)/(°)	$\bar{\beta}$/(°)
A	795	0.3	0.1	−0.2	−0.20
A	802	0	−0.2	−0.2	
B	791	0.5	0	−0.5	−0.45
B	796	0.2	−0.2	−0.4	
C	806	0	−0.1	−0.1	−0.10
C	801	0.1	0	−0.1	



(a) Projectile A



(b) Projectile B



(c) Projectile C

图 13　侵彻试验照片

Fig. 13　Pictures of penetration test

由表 3 可得，在相近侵彻条件下，样弹 B 的弹体偏转角度最大，样弹 A 次之，样弹 C 的弹体偏转角度最小。由于 3 种样弹的弹体头部和中部结构相同，且弹体偏转幅度较小，因此忽略不同弹体偏转条件下头部和中部侵彻多层靶引起的偏转角度差异，认为侵彻过程中由头部和中部引起的弹体偏转相近，试验结果的差异主要由弹尾结构不同引起。因此，可以推测不同弹尾产生的偏转力矩从大到小依次为样弹 B、样弹 A、样弹 C。试验结果与理论计算结果相同。

应用弹体尾部结构引起的弹体偏转理论模型，计算了 3 种弹型侵彻 5 层建筑物靶过程中单独由弹尾结构引起的弹体偏转角度，即假设相同弹体头部和中部侵彻引起的弹体偏转角度相同。计算结果列于表 4，其中：β_1、β_2、β_3、β_4、β_5 分别为出第 1、2、3、4、5 层靶后的弹体角度，δ 为出第 5 层靶后弹体偏转角度计算结果与试验结果的相对偏差。

表 4　弹体尾部结构引起的偏转角度的计算结果

Table 4　Calculated results of deflection angle by change of tail projectile

Projectile	β_1/(°)	β_2/(°)	β_3/(°)	β_4/(°)	β_5/(°)	δ/%
A	−0.018	−0.041	−0.077	−0.140	−0.250	25
B	−0.029	−0.079	−0.160	−0.300	−0.530	18
C	−0.008	−0.016	−0.028	−0.049	−0.081	8

对比表 3 和表 4 可得：理论计算得出的 3 种弹型的侵彻偏转规律与试验结果相同；理论计算结果大于试验结果，最大相对偏差为 25%，最小相对偏差为 8%。考虑到理论建模时采用的理想假设与试验情况存在一定差异，并且试验中通过高速摄影判读出靶后的弹体偏转角度也存在一定误差等，综合来看，理论计算结果与试验结果基本相同，说明理论计算对于工程设计具有一定的指导意义。

4　结　论

在速度为 0.2～1.2 km/s、着角为−30°～20°、弹体半径为 30～60 mm、尾飘斜面与弹轴的夹角为 0°～4°的工况下，分析了侵彻弹体尾部形状对弹体斜侵彻靶板时的偏转力矩的影响，计算结果与试验结果一致。结果表明：侵彻仰靶时，弹尾形成负的偏转力矩，致使弹体“低头”；侵彻俯靶时，弹尾形成正的偏转力矩，致使弹体“抬头”；偏转力矩随着尾飘斜面与弹轴夹角 θ、尾飘沿弹轴方向的长度 L_1、着角 α、弹体半径 r 任一因素的增大而增大；相对于 L_1，θ 对偏转力矩的影响更大。

根据研究结果，当需要较大的偏转力矩时，可采用增大 θ 或 L_1 的结构设计，若两者同时增大，则效果更优；当受条件限制，无法同时增大 θ 和 L_1 时，采用增大 θ 的方式更加有效，即使采用增大 θ、缩短 L_1 的设计，也可以实现增大偏转力矩的目标。当需要较小的偏转力矩时，则采取相反的设计方式。

参考文献：

[1] 李鹏飞, 吕永柱, 周涛, 等. 弹头形状对侵彻多层靶弹道的影响 [J]. 含能材料, 2021, 29(2): 124–131.
LI P F, LYU Y Z, ZHOU T, et al. Influence of nose shape of projectile on the penetration trajectory of multilayer target [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(2): 124–131.

[2] 葛超, 董永香, 陆志超, 等. 弹丸头部对斜侵彻弹道偏转影响研究 [J]. 兵工学报, 2015, 36(2): 255–262.
GE C, DONG Y X, LU Z C, et al. Ballistic deflection on oblique penetration of projectiles with different noses [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(2): 255–262.

[3] 张丁山, 谷鸿平, 徐笑, 等. 截卵形头部平台直径对初始侵彻弹道偏转的影响 [J]. 高压物理学报, 2021, 35(5): 055102.
ZHANG D S, GU H P, XU X, et al. Effects of truncated ovate nose diameter of the penetration warhead on the ballistic deflection [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2021, 35(5): 055102.

[4] 杜华池, 张先锋, 刘闯, 等. 弹体斜侵彻多层间隔钢靶的弹道特性 [J]. 兵工学报, 2021, 42(6): 1204–1214.
DU H C, ZHANG X F, LIU C, et al. Trajectory characteristics of projectile obliquely penetrating into steel target with multi-

layer space structure [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(6): 1204–1214.

[5] 薛建锋, 沈培辉, 王晓鸣. 弹体斜侵彻混凝土过程中弹道偏转仿真分析 [J]. 系统仿真学报, 2017, 29(8): 1801–1808.
XUE J F, SHEN P H, WANG X M. Simulation analysis on ballistic deflection of projectile obliquely penetrating into concrete [J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(8): 1801–1808.

[6] 康海峰, 代廷静, 沈培辉, 等. 弹体形状对侵彻弹道的影响分析 [J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(2): 73–76.
KANG H F, DAI T J, SHEN P H, et al. The analysis of the influence of projectile's shape on penetration trajectory [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(2): 73–76.

[7] 段卓平, 李淑睿, 马兆芳, 等. 刚性弹体斜侵彻贯穿混凝土靶的姿态偏转理论模型 [J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(6): 063302.
DUAN Z P, LI S R, MA Z F, et al. Analytical model for attitude deflection of rigid projectile during oblique perforation of concrete targets [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(6): 063302.

[8] 高旭东, 李庆明. 带攻角斜侵彻混凝土的弹道偏转分析 [J]. 兵工学报, 2014, 35(Suppl 2): 33–39.
GAO X D, LI Q M. Trajectory analysis of projectile obliquely penetrating into concrete target at attack angle [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(Suppl 2): 33–39.

[9] 吴普磊, 李鹏飞, 董平, 等. 攻角对弹体斜侵彻多层混凝土靶弹道偏转影响的数值模拟及试验验证 [J]. 火炸药学报, 2018, 41(2): 202–207.
WU P L, LI P F, DONG P, et al. Numerical simulation and experimental verification on the influence of angle of attack on ballistic deflection of oblique penetrating multi-layer concrete targets for projectile [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2018, 41(2): 202–207.

[10] 邓勇军, 陈小伟, 姚勇, 等. 基于细观混凝土模型的刚性弹体正侵彻弹道偏转分析 [J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(3): 377–386.
DENG Y J, CHEN X W, YAO Y, et al. On ballistic trajectory of rigid projectile normal penetration based on a meso-scopic concrete model [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(3): 377–386.

[11] 成丽蓉, 汪德武, 贺元吉, 等. 弹体斜侵彻多层间隔混凝土薄靶姿态偏转机理研究 [J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(10): 1009–1016.
CHENG L R, WANG D W, HE Y J, et al. Effect of projectile oblique penetrating into multi-layered thin concrete slabs on attitude deflection [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(10): 1009–1016.

[12] 马兆芳, 段卓平, 欧卓成, 等. 尾裙对弹体斜侵彻混凝土薄靶弹道的影响规律研究 [J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(6): 576–579, 584.
MA Z F, DUAN Z P, OU Z C, et al. Investigation on the influence rules of the tapered tail projectile penetration into thin concrete target [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(6): 576–579, 584.

[13] 柴传国, 皮爱国, 武海军, 等. 卵形弹体侵彻混凝土开坑区侵彻阻力计算 [J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(5): 630–634.
CHAI C G, PI A G, WU H J, et al. A calculation of penetration resistance during cratering for ogive-nose projectile into concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(5): 630–634.

[14] 张爽, 武海军, 黄风雷. 刚性弹正侵彻钢筋混凝土靶阻力模型 [J]. 兵工学报, 2017, 38(11): 2081–2092.
ZHANG S, WU H J, HUANG F L. Resistance model of rigid projectile penetrating into reinforced concrete target [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(11): 2081–2092.

Influence of Penetration Deflection by the Shape of Tail Oblique Cone of Projectile

ZHANG Dingshan[1], ZHANG Bo[1], FU Liang[2], XU Xiao[1], LI Pengfei[1]

（1. *Xi'an Modern Chemistry Research Institute*, *Xi'an* 710065, *Shaanxi*, *China*;
2. *Norinco Group Testing and Research Institute*, *Huayin* 714200, *Shaanxi*, *China*）

Abstract: Aiming at the problem of deflection when the projectile obliquely penetrates a multi-layer target, a theoretical calculation model of the projectile deflection caused by the oblique cone structure of the projectile tail is established, and the change rule of the deflection with the tail structure is obtained at the

working conditions of the velocity of 0.2−1.2 km/s, the angle of attraction of −30°−20°, the radius of the projectile body of 30–60 mm, and the angle between bevel plane of tail and the projectile shaft of 0°−4°. Moreover, the accuracy of the model is verified by comparing with the test results. The results showed that the tail of the projectile forms a negative deflection moment and the projectile produces a “head down” effect when the tail of the projectile penetrated upward target, and the tail of the projectile forms a positive deflection moment and the projectile produces a “head up” effect when the tail of the projectile penetrated downward target; the deflection moment of vertical axis is about 100 times greater than that of parallel axis. The deflecting moment can be increased by increasing the angle between bevel plane of tail and the projectile shaft, the length of the tail, and the radius of the projectile. Increasing the angle between bevel plane of tail and the projectile shaft is more effective in increasing the deflection moment than increasing the tail length.

Keywords: multi-layer target; penetration; deflection moment; tail shape; oblique cone structure